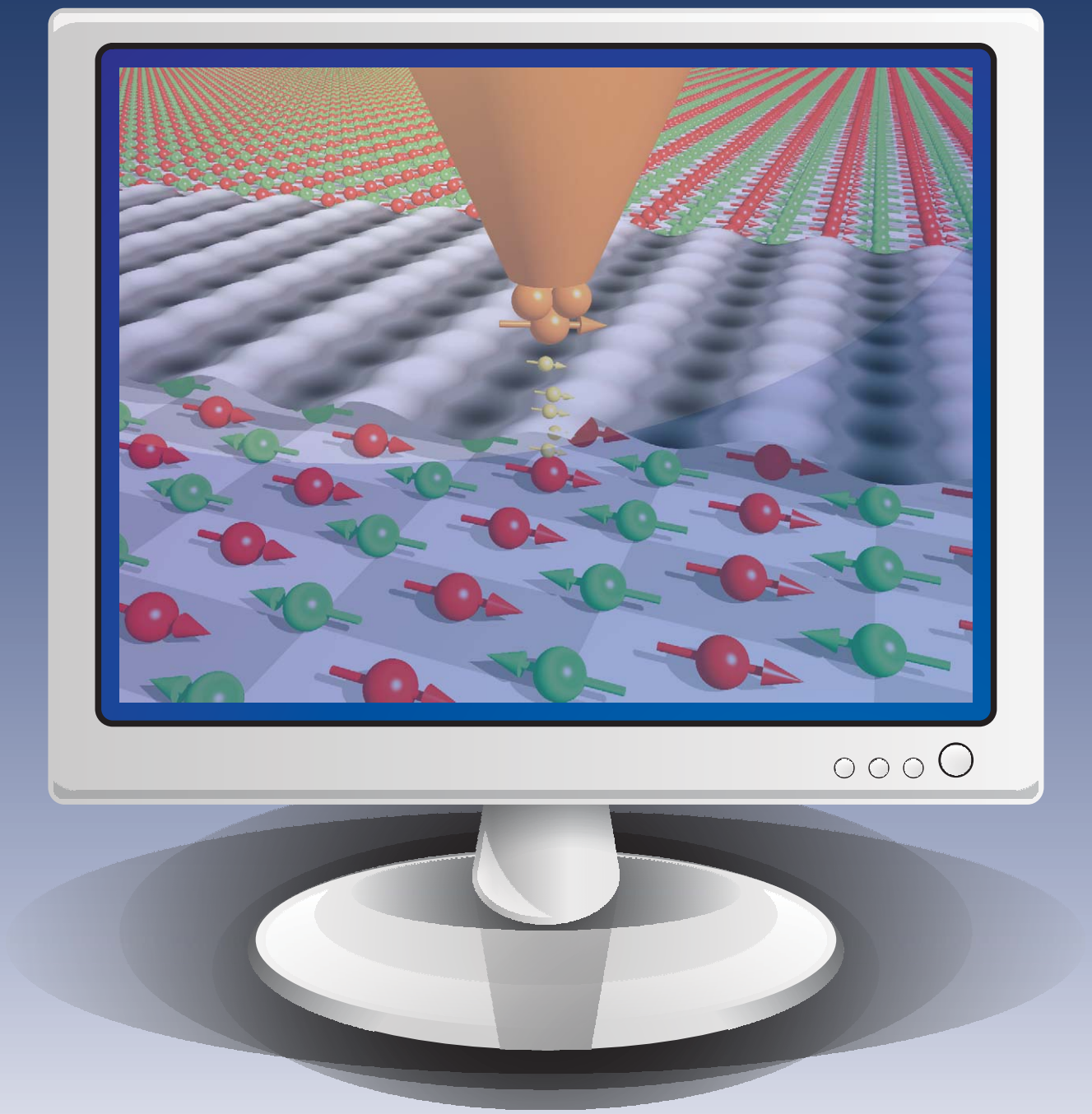
Kompetenzzentrum
HanseNanoTec

hansenanotec

Das Netzwerk für
Nanotechnologie
in Hamburg

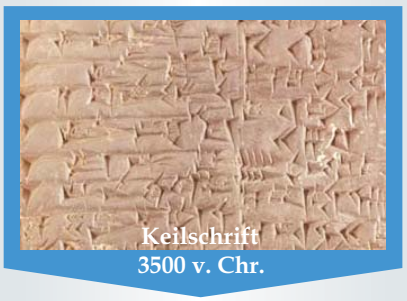
http://www.hansenanotec.de

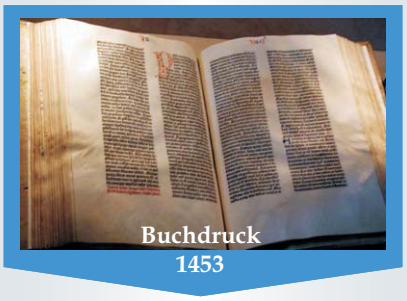
Die Zukunft der magnetischen Datenspeicherung



Bilder: http://www.wikipedia.de

Höhlenmalerei bei Lascaux
17.000 v .Chr


Keilschrift
3500 v. Chr.


Buchdruck
1453

Lochstreifen
1890

Magnetbänder
1935

Festplatte
1956

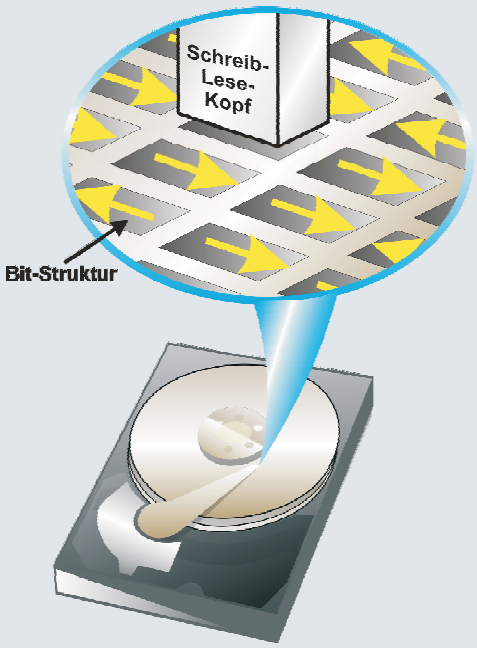
Die Entwicklung immer schnellerer und leistungsfähigerer Computer führt zu einer wahren Sturmflut digitaler Daten. Doch wohin mit all den elektronischen Dokumenten, Präsentationen, Lexika, Fotos, Filmen, Musikdateien und geografischen GPS-Informationen? Herkömmliche Methoden der magnetischen Datenspeicherung sind bald an ihre Grenzen gelangt und deshalb wird bereits jetzt mit Hilfe der Nanotechnologie an neuen Datenträgern geforscht.
Als wegweisend zeigt sich die Entwicklung neuartiger magnetischer Datenspeicher-methoden, basierend auf der Spinpolarisierten Rastertunnelmikroskopie. Auf diesen zukünftigen Datenträgern werden die Informationseinheiten in einzelne Atome geschrieben und es können dann viele Millionen mehr Daten als auf heute üblichen Festplatten gespeichert werden.

Der Begriff "Nanotechnologie", also die gezielte Erforschung, Herstellung und Manipulation von Strukturen unterhalb von 100 Nanometern (nm), taucht zwar immer öfter in den Medien auf, dennoch besteht in der Öffentlichkeit ein sehr diffuses Bild über die Zukunftstechnologie des 21. Jahrhunderts. Fakt ist, die Nanotechnologie wird alle Bereiche unseres Lebens durchdringen und verändern. Es geht dabei allerdings längst nicht mehr um die ferne Zukunft, denn viele Menschen sind bereits jetzt mit Nanotechnologie in Berührung gekommen. Sonnencremes mit UV-reflektierenden Nanopartikeln, Füllstoffe von Autoreifen, verschmutzungsfreie Wandfarben und Easy-to-clean-Beschichtungen für den Haushalt sind bereits beim Endanwender angekommen.
Aber auch in der Informationstechnologie hat die Nanotechnologie längst Einzug gehalten. In modernen Computern arbeiten Prozessoren, deren Transistoren gerade mal 50 nm groß sind und damit per Definition bereits in die Kategorie Nanotechnologie fallen.
Durch diese Miniaturisierung werden immer neue Leistungsrekorde handelsüblicher Computer möglich. Die zunehmende Digitalisierung aller Lebensbereiche hat nicht nur den normalen Arbeitsalltag, sondern auch die

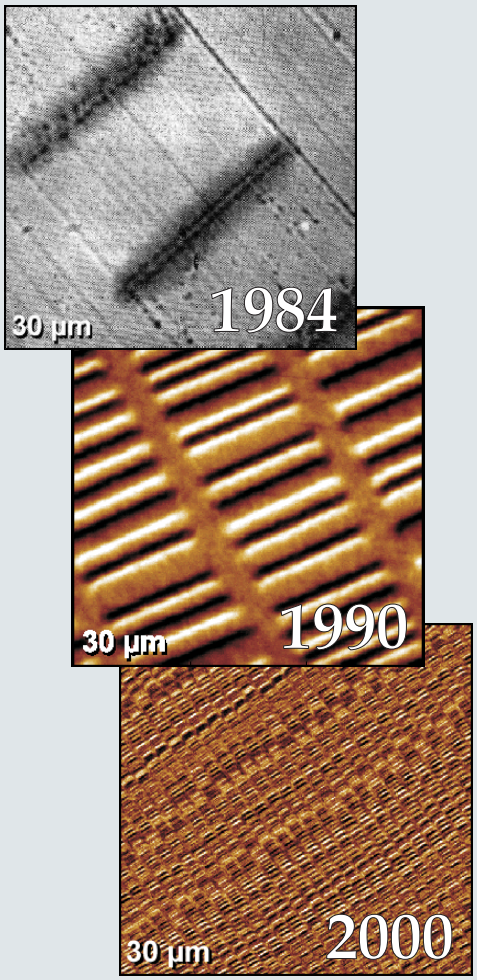
Freizeitgestaltung entscheidend verändert.
Wir leben daher in einer Zeit, in der digitale Daten explosionsartig an Bedeutung gewinnen. Egal ob es sich um wichtige berufliche Dokumente, Firmen-Präsentationen, Lexika, elektronische Bücher, Fotos, Videos oder um Musikdateien handelt - alles muss digital abrufbar sein. Allerdings sind auf lange Sicht die herkömmlichen magnetischen Datenträger nicht ausreichend, um den gigantischen Datenhunger unserer modernen Gesellschaft zu stillen.

Die heutige Festplatte

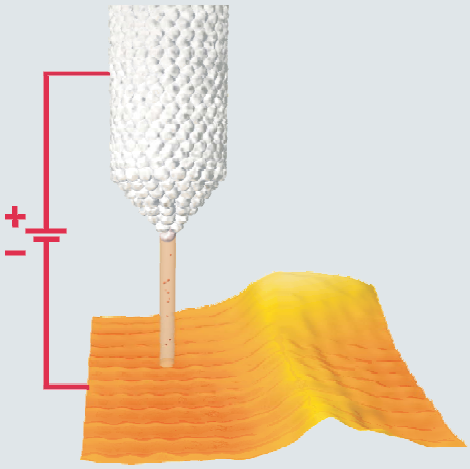
Seit den Anfängen der Informationstechnologie hatten die Benutzer mit dem Speicherproblem zu kämpfen, denn der Platz auf Datenträgern war niemals ausreichend.
Seit Jahrzehnten hat sich die Kapazität der Datenträger immer wieder vervielfacht. Dabei sind die äußeren Abmessungen dieser digitalen Silos sogar kleiner geworden. Auf die Minifestplatte "Microdrive" von IBM mit einer Außenabmessung von 4,3 cm mal 3,6 cm passen inzwischen 6 Gigabyte Daten und sie wird in mobilen Multimedia-Playern, Fotoapparaten und kleinen tragbaren Computern eingesetzt. Mehr Informationen auf engsten Raum zu schreiben ist nur möglich, wenn die Spitzen der Schreib-Lese-Köpfe und die kleinsten magnetischen Bereiche, die so genannten Bit-Strukturen, immer kleiner werden.
Das digitale Alphabet besteht aus nur zwei Zeichen, Null und Eins, und ist daher ideal zur magnetischen Codierung in Nord- und Südpol geeignet. Ein Schreib-Lese-Kopf kann die Bit-Strukturen beliebig auf Nord- und Südpol ausrichten oder einfach abfragen .
Auf einer Festplatte aus dem Jahr 2000 waren die Bit-Strukturen gerade noch etwa 100 mal 200 nm groß. Jahr für Jahr werden bessere magnetische Medien und feinere Schreib-Lese-Köpfe entwickelt. Die Bit-Strukturen werden immer kleiner und könnten eines Tages nur noch ein Atom groß sein.
Allerdings ändern Magnete ab einer bestimmten Größe immer wieder spontan die Richtung ihres Magnetfeldes. Eine fatale Eigenschaft, wenn es

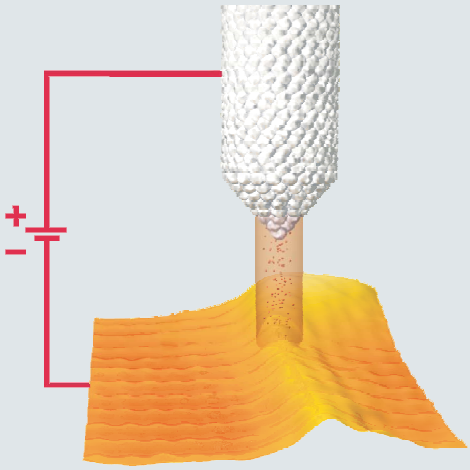


Funktionsprinzip heutiger Festplatten



Die Abbildung zeigt die Entwicklung der Abmessungen von Bit-Strukturen in den letzten zwanzig Jahren (© IBM).





Prinzip der Rastertunnelmikroskopie: Ist die Sonde weiter von der Probenoberfläche positioniert (oben), fließt ein geringerer Tunnelstrom, als wenn sich die Sonde etwas näher an der Probenoberfläche befindet (unten).

um dauerhafte Speicherung von Daten geht.
Mit Methoden aus der Nanotechnologie versuchen Forscher der Universität Hamburg diese so genannte superparamagnetische Grenze genauer zu verstehen, sie in Zukunft vielleicht zu umgehen - und sie sind erfolgreich: Mit Hilfe der Spinpolarisierten Rastertunnelmikroskopie gelang es in Hamburg weltweit erstmalig, die magnetische Information einzelner Atome auszulesen.
Wer diese neue Methode jedoch verstehen möchte, muss sich zuerst mit einigen Gesetzmäßigkeiten im Nanokosmos und mit der Funktionsweise des Rasertunnelmikroskops vertraut machen.

Der Nanokosmos und das Rastertunnelmikroskop

In der Elektronik scheint die Nanotechnologie auf den ersten Blick nichts Außergewöhnliches zu sein, lediglich ein weiterer Fortschritt in der Miniaturisierung. Tatsächlich jedoch wird Neuland betreten.
Denn der Nanokosmos, die Welt unterhalb 100 Nanometern, zeigt Eigenschaften, die sich grundsätzlich von den Gesetzmäßigkeiten der uns bekannten makroskopischen Welt unterscheiden:

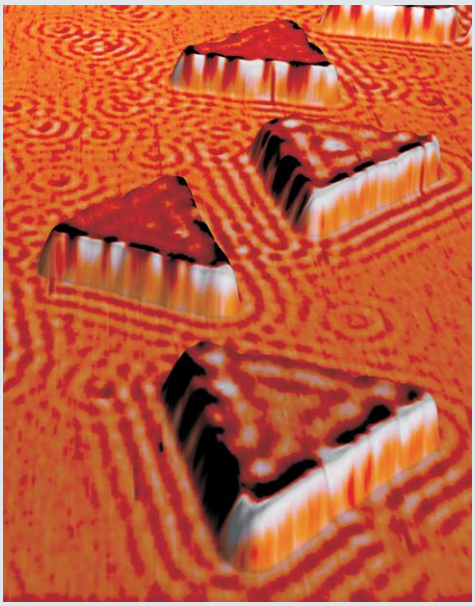
- Im Nanokosmos herrschen andere physikalische Gesetze als in der makroskopischen Welt. Hier regiert die Quantenphysik, die das Verhalten von so unvorstellbar kleinen Dingen wie Atomen und Molekülen beschreibt.
- Weiterhin ist die Welt der Atome und Moleküle für unser makroskopisches Denken eine verkehrte Welt, da die Oberflächeneigenschaften von Materialien gegenüber ihren Volumeneigenschaften eine größere Rolle spielen. Zum anderen ist der Nanokosmos unsichtbar. Alles, was in dieser Welt existiert, ist viel kleiner als die kleinsten Wellenlängen des sichtbaren Lichtes und bleibt damit unseren Augen für immer verborgen.

Da Lichtwellen für den Nanokosmos zu groß sind, liegt die Idee nahe, eine Strahlung mit kleineren Wellenlängen zu benutzen. Genau das

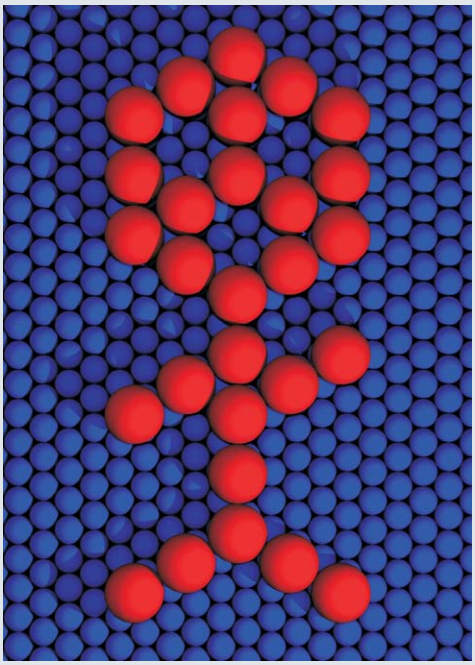
wird bei der Röntgen- und bei der Elektronenmikroskopie getan. Die verwendete kurzwellige Strahlung ist allerdings so energiereich, dass nanoskalige Strukturen zerstört werden können. Doch man muss sich dem Nanokosmos nicht mit Wellen nähern, man kann ihn auch sanft erfühlen. Das hat sogar Vorteile. Nur der Fühlende stellt fest, ob etwas glatt ist oder rau, klebrig, weich, hart, magnetisch oder elektrisch geladen. Eben dies ist die Strategie der Rastersondenmikroskope: Sie ertasten Oberflächen und deren Materialeigenschaften - sogar bis aufs einzelne Atom genau.

Das Prinzip der Rastersondenmikroskopie wurde 1981 entdeckt und war ein Meilenstein bei der Erforschung des Nanokosmos, denn erstmals war es möglich, einzelne Atome abzutasten und zu manipulieren. Gerd Binnig und Heinrich Rohrer bekamen dafür 1986 den Nobelpreis für Physik.

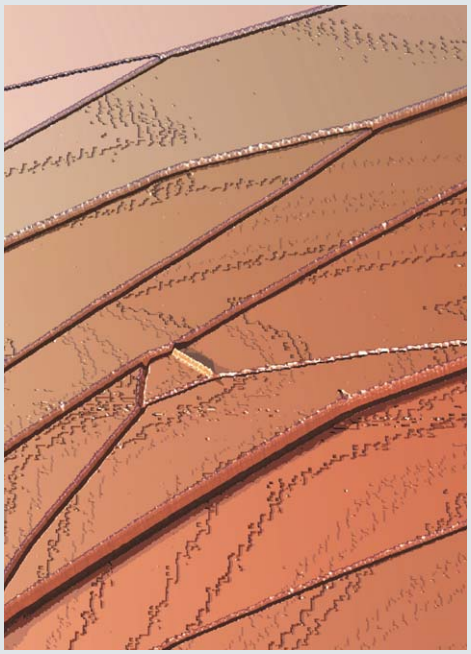
Das Rastertunnelmikroskop eignet sich zur Mikroskopie von elektrisch leitfähigen Materialien. Eine spitze Nadel, die Sonde, rastert in einem Abstand von wenigen Atomdurchmessern die Oberflächen ab. Nach Anlegen einer Spannung fließt ein schwacher Strom zwischen Sonde und Probe, obwohl sie sich nicht berühren. Diesen so genannten Tunnelstrom dürfte es nach den Gesetzen der klassischen Physik gar nicht geben, weil sich zwischen Sonde und Probe kein stromleitendes Material befindet. Anders im Nanokosmos. Hier geht es um atomare Längen und Abstände, hier gelten die Gesetze der Quantenphysik, und somit erlaubt der Tunneleffekt einem Teilchen im Nanokosmos die Überwindung von endlichen Barrieren, die nach den Vorstellungen der klassischen Physik für diese Teilchen unüberwindbar wären. Vereinfacht ausgedrückt: Sowohl die Sonde als auch das zu untersuchende Objekt sind von einer Elektronenwolke umgeben. Ein Tunnelstrom fließt, wenn der Abstand zwischen Objekt und Sonde so gering gehalten wird, dass beide Elektronenwolken sich durchdringen und Elektronen zwischen der Spitze und der Sonde ausgetauscht werden.

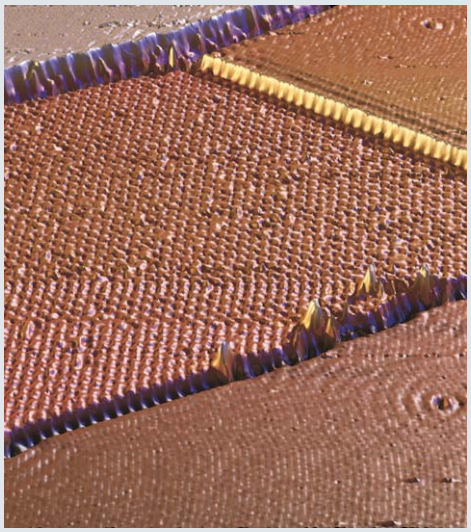


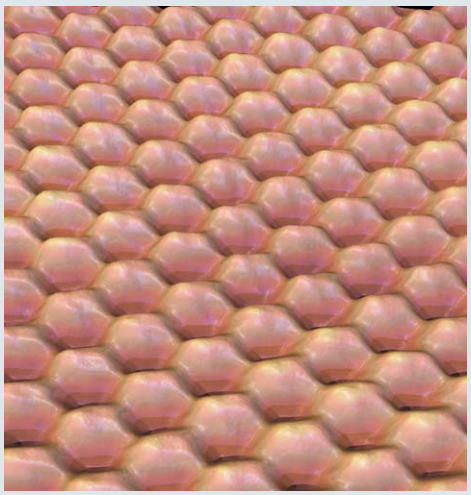
Kobaltinseln mit einer Höhe von zwei atomaren Lagen auf einer Kupferoberfläche. Die wellenartigen Muster sind Interferenzen der Elektronenwellen, welche an den Kobaltinseln und anderen Defekten im Kristall gestreut werden. Die Aufnahme wurde mit einem Rastertunnelmikroskop gemacht.



Diese Illustration zeigt den wohl kleinsten Zwerg der Welt, der von dem amerikanischen Physiker Don Eigler bei IBM mit Hilfe eines Rastertunnelmikroskops aus 28 Kohlenmonoxid-Molekülen auf einer Platinoberfläche erzeugt wurde.







Dreidimensionale Abbildungen von Oberflächenatomen eines Kupferkristalls in unterschiedlichen Auflösungen.

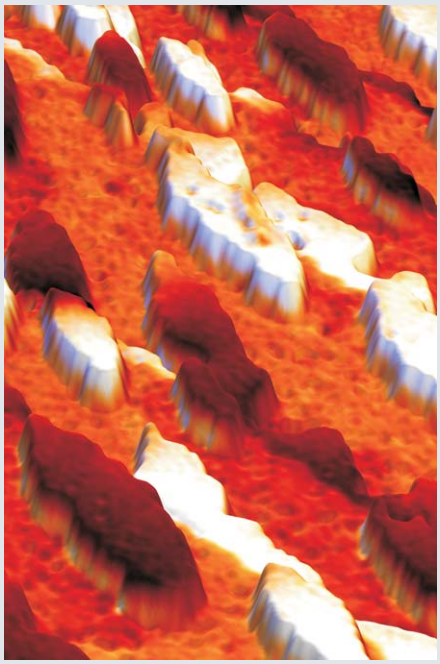
Das Besondere am Tunnelstrom: Er reagiert äußerst sensibel auf kleinste Abstandsänderungen zwischen der Sonde des Mikroskops und der Probe. Der Tunnelstrom wird daher fast ausschließlich vom Abstand des äußersten Sondenatoms zum nächstgelegenen Atom der Probe bestimmt.
Rastertunnelmikroskope werden in verschiedenen Messmodi betrieben: In der Regel findet der Konstant-Strom-Modus Anwendung. Hier wird der Abstand der Sonde zur Oberfläche Punkt für Punkt auf den gleichen Tunnelstrom eingestellt, um insbesondere bei unbekannten Oberflächen Kollisionen von Sonde und Probe zu vermeiden. Als Messwert dient dabei die Strecke, die sich die Sonde an die Probe annähern oder von ihr entfernen muss, um den konstanten Tunnelstrom einzustellen. Somit lässt sich nun über die Position der Spitze ein dreidimensionales Bild der Oberfläche rekonstruieren.
Bewegt wird die Sonde - zum Teil auf den Bruchteil eines Atomdurchmessers genau mit Hilfe von Piezokristall-„Nanomotoren“, die sich beim Anlegen einer elektrischen Spannung kontrolliert verformen lassen.
Eine weitere Eigenschaft macht Rastertunnelmikroskope zu einem eleganten Werkzeug der Nanotechnologie, denn sie können einzelne Atome und Moleküle nicht nur abbilden, sie können sie auch bewegen. Atome lassen sich mit diesen Mikroskopen verschieben oder auch von ihnen aufheben und absetzen, wie von einem Kran. Die bekanntesten Experimente gelangen hier dem amerikanischen Physiker Don Eigler. Schon 1991 verblüffte er die Weltöffentlichkeit, als er mit 35 Xenonatomen den Schriftzug "IBM" erzeugte.

Das Spinpolarisierte Rastertunnelmikroskop

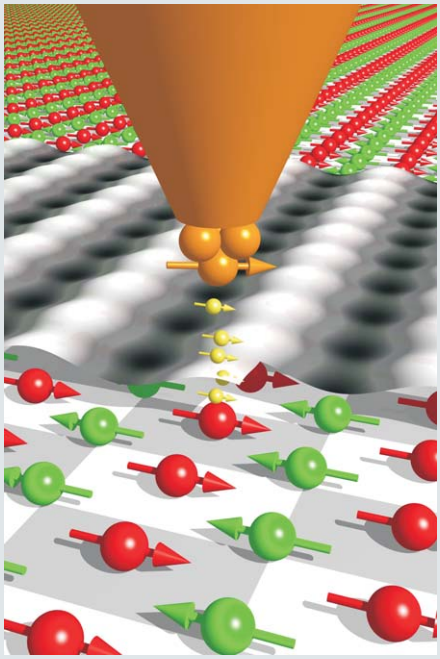
Für viele Anwendungen sind die Eigenschaften eines Materials wichtiger als seine Topographie. Ein Rastertunnelmikroskop "sieht" die elektronischen Zustände der untersuchten Probe und diese stehen in direktem Zusammenhang mit ihren diversen Materialeigenschaften, wie elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, chemische Aktivität und Magnetismus. Die

Messung von magnetischen Eigenschaften der Probenoberfläche führt nun zurück zur Datenspeicherung auf atomarer Ebene.
Mit einer kleinen Modifikation kann ein Rastertunnelmikroskop magnetische Eigenschaften einer Probe ertasten - und zwar aufs Atom genau: Mit einer magnetischen Sonde. Elektronen haben nicht nur eine elektrische Ladung, sie haben auch einen Spin. Anschaulich und stark vereinfacht kann der Elektronenspin als Rotation des Teilchens um seine eigene Achse beschrieben werden. Dieser Spin ist die eigentliche Ursache des Magnetismus und ist auf der Grundlage der klassischen Physik wiederum nicht erklärbar. Bei einem Magnet zeigt der Elektronenspin vieler benachbarter Atome in die gleiche Richtung. Ist die magnetische Ausrichtung der Sondenspitze parallel oder antiparallel zur Magnetisierungsrichtung der Probe, dann fließt eine unterschiedliche Zahl von Elektronen. Im Spinpolarisierten Rastertunnelmikroskop ist der Tunnelstrom daher auch von den Magnetisierungsrichtungen der Probe und Spitze abhängig. Auf diese Weise können Rastertunnelmikroskope tatsächlich Atom für Atom den magnetischen Zustand einer Probe bestimmen.
Aufsehen erregende Messungen erfolgten auch an antiferromagnetischen Proben. Bei Antiferromagneten zeigt der Elektronenspin benachbarter Atome in die jeweils entgegengesetzte Richtung. Mit einem Spinpolarisierten Rastertunnelmikroskop gelang es Wissenschaftlern am Hamburger Zentrum für Mikrostrukturforschung, diese von Atom zu Atom wechselnden Spinrichtungen erstmals sichtbar zu machen. Für diese Leistung wurde Prof. Dr. Roland Wiesendanger und Dr. Matthias Bode der Phillip Morris Forschungspreis 2003 verliehen.

Ein Lesegerät für „Nanofestplatten“ ist also bereits vorhanden. Wenn es jetzt noch gelingt, einen Datenträger zu entwickeln, auf dem digitale Informationen Bit für Bit in benachbarte Einzelatomen gespeichert werden können, wäre es möglich, die gesamte Literatur der Menschheit auf der Größe einer Briefmarke zu speichern.



„Canyonlandschaften“ aus atomaren „Eisenbergen“, die gerade mal ein Atom hoch und zum Teil nur 10 bis 20 Atome breit sind. Helle Flächen entsprechen dem magnetischen Nord-, die dunklen dem magnetischen Südpol.



Eine schematische Abbildung, die das Experiment beschreibt, in dem mit dem Spinpolarisierten Rastertunnelmikroskop die magnetischen Eigenschaften einzelner Atome sichtbar gemacht wurden.

Universität Hamburg

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

RIS ++ Hamburg

BDF Beiersdorf

Herausgeber:

Kompetenzzentrum HanseNanoTec
Universität Hamburg
Jungiusstr. 11
20355 Hamburg

http://www.hansenanotec.de

Leiter:

Prof. Dr. Roland Wiesendanger
Tel.: +49 40/4 28 38 - 5244
E-Mail: wiesendanger@physnet.uni-hamburg.de

Geschäftsführung und Öffentlichkeitsarbeit:

Dipl.-Chem. Heiko Fuchs
Tel.: +49 40/ 4 28 38 - 69 59
Fax.: +49 40/ 4 28 38 - 69 59
E-Mail: hfuchs@physnet.uni-hamburg.de

Text:

Prof. Dr. Roland Wiesendanger & Heiko Fuchs

Konzept und Gestaltung:

Heiko Fuchs & Aaron Budde

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers mit Quellennachweis.